



TITLE:

STUDY ON BUBBLE BEHAVIORS IN SUBCOOLED FLOW BOILING(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Cao, Yang

CITATION:

Cao, Yang. STUDY ON BUBBLE BEHAVIORS IN SUBCOOLED FLOW BOILING. 京都大学, 2016, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2016-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19706>

RIGHT:

許諾条件により本文は2017-03-23に公開; 許諾条件により要旨は2016-03-31に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	曹陽
論文題目	STUDY ON BUBBLE BEHAVIORS IN SUBCOOLED FLOW BOILING (サブクール流動沸騰における気泡挙動に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本研究はサブクール流動沸騰現象を対象とし、高時空間分解カメラを用いた気泡挙動、特に伝熱面からの気泡離脱挙動の詳細な可視化観察を行い、これまで明らかにされて来なかった気泡離脱時の表面張力駆動流れによる凝縮効果、高サブクール度や高流速条件で温度境界層が薄くなることによる特異な気泡離脱および気泡凝縮挙動を実験的に見出すとともに、その物理機構についての考察を深めた。また、離脱気泡表面に生ずる波の形成過程とその凝縮促進効果を考察するとともに、複数の気泡が初生气泡の上流側・下流側に連続して発生し、合一・離脱する過程を初めて捉え、上流側に複数の気泡が発生する場合には合一後の気泡塊は伝熱面上に長時間留まることを見出した。本論文はこれらの研究成果を取り纏めたものであり、以下の6章から構成されている。</p> <p>第1章の序論では本研究の背景と目的について述べている。まず、サブクール・プール沸騰及びサブクール流動沸騰現象について既存知識を整理し、サブクール流動沸騰現象の伝熱研究の現状および気泡ダイナミクス研究の現状を詳細にレビューするとともに、既往実験研究の限界と本研究の特徴と狙いについて記述するとともに、本論文の構成を述べている。</p> <p>第2章ではサブクール流動沸騰実験装置および実験条件（壁面熱流束 92～490W/m²、サブクール度 5～50K、平均液流速 0.1～0.8m/s）の概要を述べるとともに、本研究の特徴である高時空間分解能可視化計測システム（高速カメラとカセグレン光学望遠鏡）について記述している。また、可視化観察で得られない温度・速度場の時空間データを得るために実施した数値解析手法、3次元非定常混相流解析手法である MARS(Multi-interface Advection and Reconstruction Solver)について、その概要を述べている。</p> <p>第3章ではサブクール流動沸騰における伝熱面からの単一気泡の離脱挙動について、サブクール度、液流速、壁面熱流束を変化させた場合の離脱機構について考察している。低液流速(0.3～0.4m/s以下)の場合、(1) 低サブクール度(10K以下)では沸騰気泡の形状は上流側気泡根元部分で多少の変形はあるものの、プール沸騰とほぼ同様な気泡成長・離脱挙動を示すこと、(2) 中程度のサブクール度(10～30K)では、沸騰気泡の下流側形状はプール沸騰と殆ど同様な気泡状で成長しているが、上流側根元部分が大きく変形することを見出した。この発生機構について、気泡下流側に形成される後流域では流速が小さいために過熱液層は攪拌されず、過熱度が維持されるために気泡形状はプール沸騰時と同様な状況が維持されるために生じていると考察している。これに対して、上流側では気泡界面上に形成される温度勾配に起因するマランゴニ対流が発生し、連続条件を満足するために上流側バルク・サブクール水が気泡根元部分への吸い込みにより凝縮が発生すると考察している。さらに、MARS法による表面張力係数の温度依存性を考慮した数値シミュレーションを実施し、気泡変形・離脱挙動</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	曹 陽
<p>や気泡表面近傍のベクトル場からマランゴニ対流の存在が気泡根元部での凝縮を促進して非対称な気泡変形を生じさせていることを明らかにした。また、伝熱面から離脱した沸騰気泡のバルク・サブクール水中での凝縮過程において、沸騰気泡の表面上を波が伝播する現象を初めて見出し、その発生機構についても言及している。</p> <p>第4章では低流速・高サブクール度条件で特異的に現れる2気泡連続離脱現象に関する熱流動機構を考察している。30K以上の高サブクール度条件では気泡離脱時に気泡ネックが形成されること、多くの場合気泡ネックの一部が壁面に残留して連続した気泡成長・離脱挙動を生ずるが、第三番目の気泡発生は認められないことを見出した。この連続する2気泡生成の物理機構について、温度境界層と活性核の関係から高サブクール条件では小さな気泡が活性核となり離脱速度が相対的に大きいこと、気泡ネックが成長する原因は気泡底部の一時的なドライアウトである可能性があることから、レイリー不安定性でネックが切断されるためにドライアウトした壁面上に気泡の一部が残留して第2気泡が生成すると考察している。また、可視化計測から第2気泡の最大径は第1気泡より小さく、成長速度がかなり遅いことも見出されており、第1気泡が成長時に必要な除熱量が伝熱面の熱容量に比べて大きい場合には、伝熱面は過熱度以下に冷却され、過熱状態までの回復に時間がかかるため、第2気泡の成長が抑制されたものと考察している。このことは、沸騰伝熱面の設計時に伝熱面の熱容量(材質と厚さ)が沸騰伝熱特性に大きな影響を与えることを示唆している。これらの知見は、沸騰流動伝熱の機構論的モデル化の高度化へ大きな貢献を果たすと期待できる。</p> <p>第5章では、初生気泡の上流側および下流側に連続的に発生した気泡が合体し、離脱する過程を初めて可視化像として捉え、伝熱面上に滞留する気泡塊の成因の一例を示している。特に、高液流速(0.3～0.4m/s以上)の場合、速度・温度境界層は低液流速時に比べて薄くなり、低サブクール度ではプール沸騰と同様に球形状気泡として離脱するが、高サブクール度では温度境界層端の低温バルク流が成長中の気泡上流側の側部に接触するために局所的に凝縮して側部に窪みを形成し、その後窪みが気泡内へさらに侵入して気泡離脱時に2～3の小気泡へ分裂する現象を見出した。この現象は、従来の気泡生成数密度のモデル化には考慮されておらず、流動沸騰伝熱モデルの見直しの必要性を提示している。このほか、伝熱面上に発生した気泡の下流側および上流側に複数の気泡を連続して発生し、それらが合一して伝熱面上に大きな気泡塊を形成することを世界で初めて可視化により見出し、低クオリティ DNB (Departure from Nucleate Boiling)-CHF の先行現象の一種である可能性に言及している。</p> <p>最後に6章では結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、今後の研究への提言を述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本研究はサブクール流動沸騰現象を対象とし、高時空間分解カメラを用いた気泡挙動、特に伝熱面からの気泡離脱挙動の詳細な可視化観察を行い、種々のサブクール度および流動条件における気泡ダイナミクスを実験的に検討し、その物理機構について考察を深めることを目的としている。得られた主な成果は以下の通りである。

1. 低液流速(0.3~0.4m/s 以下)の場合、低サブクール度(10K 以下)ではプール沸騰とほぼ同様な気泡成長・離脱挙動を示すこと、中程度のサブクール度(10~30K)においては、沸騰気泡の上流側根元部分が大きく変形することを見出した。
2. 気泡変形の原因について、気泡上流側では気泡界面上に形成される温度勾配に起因するマランゴニ対流が発生し、低温のバルク・サブクール水の気泡根元部分への吸い込みにより上流側根元部での凝縮が生じることに起因すると考察し、表面張力係数の温度依存性を考慮した数値解析によりマランゴニ対流の存在が気泡根元部での凝縮を促進して非対称な気泡変形を生じさせていることを明らかにした。
3. 伝熱面から離脱した沸騰気泡のバルク・サブクール水中での凝縮過程において、沸騰気泡の表面上を波が伝播する現象を初めて見出し、その発生機構についても考察した。
4. 30K 以上の高サブクール度条件においては、凝縮による気泡根元部分の変形は気泡上流および下流の両側で見られ、気泡離脱時には非常に細くて長い気泡ネックが形成されること、気泡ネックの一部が壁面に残り、連続した気泡成長・離脱挙動を生ずることを見出し、その生成機構について考察した。
5. 高液流速(0.3~0.4m/s 以上)の場合は、速度・温度境界層が低液流速時に比べて薄くなり、低サブクール度ではプール沸騰と同様に球形状気泡として離脱するが、高サブクール度の場合は温度境界層端の低温バルク流が成長中の気泡上流側の側部に衝突し、局所的に凝縮して側部に窪みを形成し、その後、窪みが気泡内へさらに侵入して気泡離脱時に 2~3 の小気泡へ分裂する現象を見出した。これは、従来の気泡生成数密度のモデル化には考慮されておらず、流動沸騰伝熱モデルの見直しの必要を提示した。
6. 伝熱面上に発生した気泡の下流側および上流側に複数の気泡が連続して発生し、それらが合一流して、伝熱面上に大きな気泡塊を形成することを世界で初めて見出した。

以上のように、本論文は種々のサブクール流動沸騰条件について、気泡離脱時の表面張力駆動流れによる凝縮効果、高サブクール度や高流速条件での特異な気泡離脱および気泡凝縮挙動を実験的に見出しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年2月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日： 2016 年 3 月 31日以降